

现代预应力技术在我国 空间网格结构中的应用与发展

李明 陈扬骥 李宪立

摘要 近几年,现代预应力技术在空间网格结构中得到了越来越广泛的应用。通过在空间网格结构中施加预应力,能够大大提高结构的刚度,节约钢材,降低工程总造价;同时能够使建筑师充分发挥自己的想象,设计出更为优美的结构造型,因此具有良好的社会效益和经济效益。作为建筑学科的新成就,这种新结构形式的发展前景是广阔的,但是有许多内容需要进行深层的理论探讨。

关键词 预应力技术 空间网格结构 应用与发展

一、前言

最近几十年来,作为大跨度、大空间建筑形式的空间结构以其新颖的结构形式,优雅的结构造型和强大的跨越能力,在整个世界得到了长足的发展。特别是近几十年来,空间结构在世界范围内被广泛地运用,并得到了迅猛的发展。这种结构形式为建筑结构跨越能力的提高和空间形体的多样性提供了充分的空间,目前已广泛用于体育馆、展览馆、影剧院、会堂、候车厅等公共建筑和飞机库、仓库、工业厂房等工业建筑。

在目前的实际工程中,空间结构可分为以下几种类型:薄壳结构,网壳结构,网架结构,悬索结构,折板结构,膜结构等。在众多的空间结构中,以网架结构及网壳结构为代表的空间网格结构是一种应用较为广泛的结构形式。在各种不同的结构中,它以受力合理,重量轻,造价低,结构形式新颖丰富,生动活泼等特点而受到结构工程师们的青睐。

但是随着人们对空间结构自身的跨越能力及空间造型提出更多、更高的要求,传统的较为单一的结构形式越来越难以满足需要。人们开始将几种不同的结构形式进行优化组合,这样的结构形式能够以一种基本结构的优点来弥补另一类基本结构的缺点。

预应力技术是一项古老的技术,最先在钢筋混凝土结构中得到广泛的应用,其基本原理是在结构中引入初始应力,扩大构件的弹性工作范围,籍此来提高结构的承载力和刚度,从而改善结构的受力性能。现代预应力钢结构中利用预应力并发展成为一门工程学科,则是在20世纪50年代前后。1948年前苏联的BMBaXYPKNH等工程师就建成一座预应力跨路钢桥,利用桥面自重荷载就位的先后顺序在结构中引入预应力。1953年比利时的G. Magnel教授在研究和试验的基础上,建成布鲁塞尔飞机库大门的预应力双跨连续钢桁架。1953年美国的威斯基建筑师设计并建造了著名的雷里竞技场(ReleignArena),它的双曲抛物面预应力悬索屋盖及流畅的建筑造型一时风靡国际,成为以后悬索预应力空间网格结构在世界各地广泛应用的示范典型。

预应力钢结构学科虽然诞生于本世纪五十年代,但只是在最近几年,预应力技术才在我国的空间网格结构中得到越来越广泛的应用。预应力空间网格结构能够充分发挥高强预应力索的性能,大大地提高空间结构的刚度,减少结构的挠度,能够节约钢材及工程的总造价。在空间网格结构中采用预应力技术,能够使建筑师充分发挥自己的构想,设计出更为优美的结构造型,推进建筑艺术

的发展。

随着预应力钢结构的广泛应用和研究,逐步形成一门分支学科。在半个世纪的历程中,预应力钢结构已基本上完成了理论分析、基本性能研究、构造设计、生产工艺等方面的研究工作⁽¹⁾。但是,这些研究工作的重点多停留在预应力构件(包括轴心拉压构件、受弯构件和组合构件)和预应力平面结构体系(包括预应力桁架、预应力拱和预应力框架)上。早期预应力技术应用于空间网格结构的工程并不是很多,并且当时空间网格结构在全世界范围内的发展还不成熟。只有到了八十年代以后,空间网格才得到非常迅速的发展,计算、设计、施工方法日臻成熟,新技术、新工艺等不断涌现⁽²⁾,使得空间网格结构成为大跨度、大空间建筑的主要结构形式,也为预应力技术应用于空间结构提供了强有力的保证。

随着科学研究的深入发展,工程大量涌现,研究内容也逐渐从结构静态性能深入到动态与抗震,从强度弹性理论扩展到塑性、疲劳及稳定,从平面结构发展到空间体系;从设计计算延伸到经济学、可靠度及成型理论的研究,预应力钢结构学科得到大大丰富和提高,并且日益系统化、理论化和全面化。

目前在国内已经建成了许多预应力网格结构体系,其中有代表性的预应力网格结构体系的工程列于表1中⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

表1 国内预应力空间网格结构的工程应用

工程名称	网格形式	平面尺寸×厚度(米)	矢高(米)	预应力形式	建成年份	备注
四川省攀枝花体育馆	JK-I型球壳	60×64.9×1.8	8.89	预应力索	1994	省钢38%
广东省清远市体育馆	6块组合扭壳	81.1×93.6×2.8	8.0	预应力索	1994	省钢32%
广东省肇庆市体育馆	4块组合扭壳	54.9×69.3		预应力索	1996	省钢33.4%
华南理工大学文体活动中心	圆形悬挂结构中央支撑	D=54		预应力索	1994	省钢12%
上海国际购物中心	正放四角锥组合网架	27×27×2		预应力索	1994	省钢32%
天津宁河体育馆	正放四角锥网架	42×42×3		支座位移	1984	省钢12%
广东省阳江市体育馆	双曲扁网壳	44×56		预应力索	1996	省钢43%

二、空间网格结构中施加预应力的方式及布索方案的选择

(一)空间网格结构中施加预应力的方式

一般来说,在空间网格结构中施加预应力有两种方式:一是在网格结构的下弦平面内或者下弦平面下布置预应力索;也可以在网格结构的周

边布置预应力索,通过对预应力索的张拉建立与外荷载作用反向的挠度和内力。二是通过对网格结构的支座高差进行强行调整就位,使网格结构建立预应力⁽⁶⁾。

在我国已经建成的数十个预应力空间网格结构中,这两种施加预应力方法均有工程实例,详见表1所示。采用第一种方式施加预应力需要专门的设备,由于施加预应力形成的内力,一般由结构内部平衡。采用第二种方式施加的预应力,只是在网格结构的施工过程中,通过改变支座就位的高差来调整结构的内力,这是一种较为经济的施加预应力的方法,几乎无需增加任何杆件和零部件,但是,这种方法往往会产生较大的支座内力及变形,设计时应采取措施予以解决。究竟在设计中采用何种形式,应根据具体工程进行分析,选用合理的方式施加预应力。

本文主要讨论第一种方式。

(二)空间网格结构的布索方案

要给出一个通用的网格结构的布索方案是比较困难的,这不仅与结构形式有关,而且还与结构的建筑功能和使用要求有关。

在满足建筑使用功能的前提下,布索方案的选择就是应该尽量提高预应力的经济效益。通过预应力的施加,将使得一部分杆件产生与荷载作用下相反的内力和变形,这类杆件称为卸载杆;同时也有一部分杆件产生相同的内力和变形,这类杆件称为增载杆;对于内力几乎不受影响的杆件称为中性杆。预应力的布索原则,就是在预应力作用下,结构产生最多数量的卸载杆,最少数量的增载杆,以最大限度的发挥高强度钢索的承载能力,使网格结构的卸载作用达到最大,从而降低整个工程的总造价。通过布索分为结构内布索和结构外布索:结构内布索时,钢索在结构的高度范围内;结构外布索是将索布置于结构体外,一般要增加建筑的高度,同时还要增设附加支承杆件和节点。

攀枝花体育馆屋盖网壳结构见图1⁽⁷⁾。根据其空间几何关系宜在下部壳外布索,布索方案大体可分两类,一类为壳边缘布索(方案I一边桁外配索A—A;方案II一支座两两相间配索B—B);另一类为壳中部布索(方案III一支座对角线拱式配索C—C;方案IV一对角线下撑式壳外配索

D—D)。方案Ⅲ、Ⅳ均能约束支座径向位移变形，方案Ⅳ外伸腿还能减少壳的跨度，加之矢高大，也能降低杆件的内力，但拉索位置要占用较大的空间，只有在客观条件允许时方能采用。方案Ⅰ、Ⅱ只要恰当处理边构形体，既能获得上抬力使网壳产生反拱度，减少荷载作用下的挠度，提高结构的整体刚度，又能产生环箍力，约束径向位移，使得结构出现相当数量的卸载杆，从而改善网壳的受力性能。文献(7)通过对几种方案的分析比较得出：就卸载效应对比，方案Ⅳ最好，方案Ⅰ最差；就反拱度效应而言，方案Ⅳ最好，方案Ⅱ次好。但是，建筑功能要求，不能将预应力结构体系外露，因此，该体育馆最终采用方案Ⅰ。

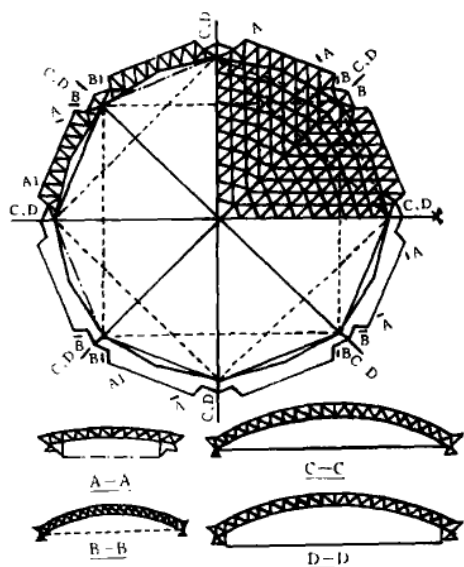


图1 攀枝花体育馆预应力方案

文献(8)以70m×70m×3.6m的正放四角锥预应力网架采用不同的布索方案进行了计算分析，如图2所示。方案Ⅰ按网架下弦布索，构造简单，施工方便，但预应力效果仅以下弦为主，对腹杆作用的卸载杆和增载杆各约50%，对上弦杆的影响较小，大约可节约钢材12%~15%左右。采用折线布索后，下弦跨中内力较大的杆件获得较大的反向预应力，而且锚固端位于承压能力较强的上弦边缘，施加的预应力的大小比方案Ⅰ大，效果明显。腹杆卸载杆增多，上弦跨中也出现卸载。不同的折线型布索方案预应力对杆件的内力影响

如图所示。文献(8)中经过综合分析比较，方案Ⅲ或方案Ⅱ效果较理想，当网架的跨度较大时，可采用方案Ⅰ与方案Ⅲ或方案Ⅱ的共同配索方案。折线配索后，网架用钢量可减少约20%，大大降低跨中的应力，使网架跨中应力分布更均匀、平缓；同时，网架的变形减小，刚度提高。

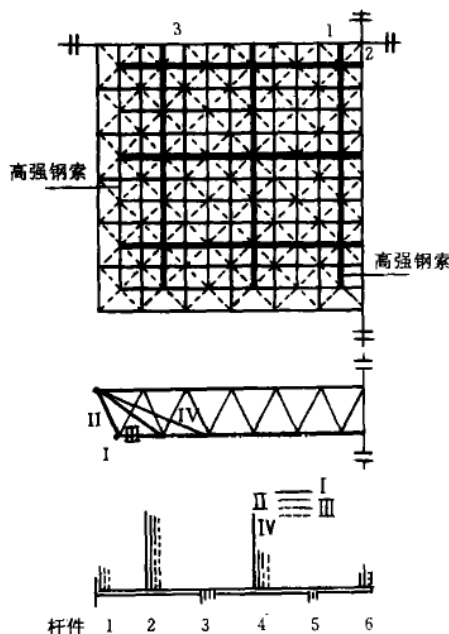


图2 网架结构布索方案

(三)合理的索力选择和预应力施加顺序

在空间网格结构中施加多大的预应力是一个比较难以确定的问题，即怎样才能确定一个最佳的预应力力度。合理的预应力应该满足以下条件：(1)应该保证预应力拉索在结构的正常工作条件下不松弛；(2)索的布置应满足使用功能的要求，并且应当方便施工；(3)在满足上述条件的前提下，应使整个工程的总造价最省。

一般来说，结构的预应力的施加都是一个不断的反复过程，往往需要经过一个“加载——张拉——加载——张拉——加载”的循环过程。只有通过一个过程，才能使得整个结构的应力分布均匀并达到最佳受力状态。由此带来的结构计算问题，也是一个全过程计算，这实质上是预应力的加载顺序在结构计算上的反映。加载顺序的选择一般要根据屋面荷载的可分性，施工设计与工艺的可行性及简化构造、最大限度的提高结构的承载力、

节约钢材、降低造价等原则来确定。

三、预应力空间网格结构的发展前景

在空间网格结构中施加预应力,这是建筑结构学科的新成就,这种新结构形式的发展前景是广阔的,但是目前为止,这一前沿的分支学科仍有许多课题需进行深层的理论分析与研究。

(一)结构的形式和结构的跨度

随着在空间网格结构中施加预应力及其它一些新技术、新方法的采用,使得空间结构具有了更大的跨越能力,这就使得建筑师有了更大的发挥想象的能力,设计出多种多样、造型美观的空间网格结构。对于结构工程的科研工作者,可以着手进行大跨度、超大距度的空间网格结构(例如跨度为500m以上,甚至1000m以上)的理论研究工作。

(二)结构计算的理论和方法

一般来说,空间网格结构往往有较为优美的建筑造型,这就给结构设计提出了更高的要求。选用何种计算模型,才能达到最高的计算精度。应研究复杂的空间网格结构在风荷载作用下的风载体形系数,为抗风计算提供依据。研究空间网格结构在风荷载作用下的动力反应、动力稳定性及相应的构造措施。研究大跨度空间结构在竖向及水平地震作用下的抗震分析、结构控制、消震方法与构造措施。应加强预应力空间网格结构、尤其是预应力网壳结构的非线性分析。

现在虽然已经有大量的网格结构的专用计算程序,但是要在预应力空间网格结构中采用,却还有待于继续研究,尤其是在计算理论方面。

(三)预应力空间网格结构的制作与安装

应大力研制和开发受力合理、构造简单、制作安装方便,且能定型化、标准化生产的新型节点体

系。改进和更新网格结构的加工工艺和设备,采用计算机程序控制的全自动化生产方法来加工制作杆件与节点,提高加工精度和生产效率,降低产品成本和造价。研究和开发新的施工方法和施工工艺,加快施工周期和降低施工造价。

在空间网格结构中采用预应力,具有广阔的应用前景,我们一定要大力进行这方面的研究,并尽量在更多的工程中采用,只有这样,才能通过理论与实践的有机结合,推动该学科不断发展,并通过工程实践使之更趋完善。

参考文献

- (1)陆赐麟,预应力空间钢结构的现状和发展,空间结构,1995年,第1卷第1期:PP1—14。
- (2)董石麟,姚谏,网壳结构的未来与展望,空间结构,1994年,第1卷第1期:PP3—10。
- (3)马克俭,李晓红,韦明辉,段汝忠,预应力网格结构体系的研究与应用前景,空间结构,1994年,第1卷第2期:PP1—10。
- (4)姚念亮,李良勇,姜国渔,陈建,梁保荣,潘东楼,螺栓环节点与预应力组合网架的设计研究与应用,空间结构,1994年,第1卷第1期:PP39—46。
- (5)陆赐麟,预应力空间钢结构在我国的实践与展望,建筑结构,1998年,第1期:PP20—22。
- (6)董石麟,赵阳,周岱。我国空间钢结构发展中的新技术、新结构。土木工程学报,1998年,第31卷第6期:PP3—11。
- (7)尹思明,胡瀛珊,苟克成,董绍云,预应力钢网壳的某些静力性能研究,空间结构,1995年,第1卷第1期:PP38—47。
- (8)舒贻平,吕志涛,王培。预应力网架和组合网架的分析与研究,工业建筑,1997年,第27卷第7期:PP7—11。
- (9)董石麟,姚谏,网壳结构的未来展望,空间结构,1994年,第1卷第1期:PP3—10。

(上接第21页)

2. 通过本工程的安装,可以发现温度的变化对焊接节点网架(壳)的影响非常明显。采用连接杆件一端固定,一端滑动的方案,简单易行,能确保结构在要求的条件下合拢。

3. 网架(壳)安装前,必须对土建预埋件进行测量验收,发现存在偏差,必须提前制定合理的整改方案,否则将影响结构的安装质量和施工进度。

4. 采用可调支点对类似工程的安装、对结构

的挠度与精度的控制、对保证结构的安装质量具有重要的作用。

参考文献

1. 赵基达等,浙江黄龙体育中心体育场挑蓬结构计算分析,第八届空间结构学术会议论文集,1997年10月
2. 网架结构设计与施工规程(JGJ7—91),北京:中国建筑工业出版社,1991
3. 上海市标准,网架结构技术规程(DBJ08—52—96),上海:1997